

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Kerekeš

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić, dipl. ing.

Student:

Nikola Kerekeš

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se izv. prof.dr.sc. Mirku Jakopčiću na velikoj pomoći, uloženom trudu, savjetima i razumijevanju koje mi je pružio tijekom izrade rada.

Također želim zahvaliti svim zaposlenicima Zavoda za materijale te Katedre za materijale i tribologiju na pruženoj stručnoj pomoći, savjetima i vremenu pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Nikola Kerekeš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika



| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

NIKOLA KEREKEŠ

Mat. br.:0035192852

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

TRIBOLOŠKA ANALIZA MATERIJALA CIJEVI JURIŠNE PUŠKE

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**TRIBOLOGICAL ANALYSIS OF ASSAULT RIFLE BARREL
MATERIALS**

Opis zadatka:

U zatvorenom prostoru barutne komore tlak barutnih plinova prilikom opaljenja naglo raste, te se stvara dovoljno velika potisna sila na dno zrna kod pješačkog, odnosno dno projektila kod topničkog oružja, pod čijim se djelovanjem zrno/projektil kreće prema ustima cijevi. Pri izlasku iz cijevi zrno/projektil mora postići potrebnu brzinu i aerodinamičku stabilnost.

Tijekom opaljenja se u cijevi oružja razvijaju intenzivni, međusobno interaktivni mehanički, toplinski i kemijski tribološki procesi. Njihovim djelovanjem nastaju višestruki mehanizmi trošenja materijala uzduž kanala cijevi: abrazija, adhezija, erozija i tribokorozija. U uvjetima borbenog djelovanja, uz moguće prekoračenje propisanoga režima paljbe, ovi mehanizmi trošenja eksponencijalno rastu. Istodobno, vanjska površina cijevi izložena je tribološkom djelovanju okoline. O stupnju istrošenosti cijevi treba voditi stalnu brigu, jer on utječe na promjenu balističkih, a time i taktičko-tehničkih značajki oružja.

U ovome radu je potrebno:

1. Opisati namjenu, načelo rada i tehničke značajke jurišne puške,
2. Prikazati namjenu i osnovne konstrukcijske značajke cijevi jurišne puške,
3. Analizirati fizikalne i tribološke značajke procesa opaljenja jurišne puške,
4. Utvrditi kritična mjesta, oblike i posljedice trošenja kanala cijevi,
5. Analizirati uzorke materijala cijevi odabrane jurišne puške (kemijski sastav, metalografija, tvrdoća),
6. Utvrditi osnovne tribološke značajke analiziranog materijala,
7. Predložiti daljnje mjere za poboljšanje otpornosti cijevi na trošenje i dati zaključak.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

25. studenog 2015.

1. rok: 25. veljače 2016.

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. NAMJENA, NAČELO RADA I TAKTIČKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE JURIŠNE PUŠKE..... | 2 |
| 2.1. Cijev jurišne puške..... | 3 |
| 2.2. Konstrukcijske značajke/izvedbe jurišnih puški | 4 |
| 2.2.1. Jurišna puška AK-47..... | 4 |
| 2.2.2. Jurišna puška VHS..... | 5 |
| 3. ANALIZA TROŠENJA CIJEVI KOD PROCESA OPALJENJA ORUŽJA..... | 7 |
| 3.1. Zagrijavanje i hlađenje cijevi pri gađanju..... | 9 |
| 3.2. Tribološke značajke procesa opaljenja | 11 |
| 3.2.1. Mehanizmi trošenja cijevi puške..... | 12 |
| 3.2.1.1. Abrazija..... | 12 |
| 3.2.1.2. Erozijska česticama | 13 |
| 3.2.1.3. Adhezija | 15 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 16 |
| 4.1. Analiza uzorka materijala cijevi jurišne puške | 16 |
| 4.1.1. Mjerenje tvrdoće | 18 |
| 4.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje..... | 19 |
| 4.3. Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje | 21 |
| 4.4. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje | 24 |
| 5. ANALIZA REZULTATA | 26 |
| 5.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje | 26 |
| 5.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje | 26 |
| 5.3. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje..... | 29 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 32 |
| LITERATURA..... | 33 |
| PRILOZI..... | 34 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Jurišna puška VHS D1 | 2 |
| Slika 2. | Osnovni dijelovi jurišne puške | 3 |
| Slika 3. | Poprečni presjek cijevi | 4 |
| Slika 4. | Jurišna puška AK - 47 | 5 |
| Slika 5. | Jurišna puška VHS D2 | 5 |
| Slika 6. | Žlijeb razvijen u ravnini x-y | 6 |
| Slika 7. | Poprečni presjek metka | 7 |
| Slika 8. | Proces opaljenja..... | 8 |
| Slika 9. | Presjek cijevi u trenutku opaljenja | 8 |
| Slika 10. | Promjena modula elastičnosti..... | 9 |
| Slika 11. | Promjena temperature po presjeku cijevi | 9 |
| Slika 12. | Jedinični događaj abrazije | 12 |
| Slika 13. | Shematski prikaz erozije česticama..... | 13 |
| Slika 14. | Jedinični događaj procesa erozije česticama | 14 |
| Slika 15. | Jedinični događaj adhezije..... | 15 |
| Slika 16. | Leco GDS 850A optički spektrometar | 16 |
| Slika 17. | Snimka mikrostrukture uzoraka 1 i 2 sa povećanjem 1000× | 17 |
| Slika 18. | Mjerenje tvrdoće po Vickersu | 18 |
| Slika 19. | Skica uređaja “suhi pijesak/gumeni kotač” | 19 |
| Slika 20. | Uređaj “suhi pijesak/gumeni kotač” | 20 |
| Slika 21. | Detalj uređaja i trag trošenja na uzorku..... | 20 |
| Slika 22. | Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje | 21 |
| Slika 23. | Uređaj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje..... | 22 |
| Slika 24. | Glava držača sa pričvršćenim uzorkom i sapnica | 23 |
| Slika 25. | Vaga METTLER B5C 1000..... | 24 |
| Slika 26. | Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje..... | 24 |
| Slika 27. | Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje | 25 |
| Slika 28. | Dijagram gubitak mase/vrijeme trošenja za abrazivnu eroziju | 27 |
| Slika 29. | Dijagram gubitak mase/vrijeme trošenja za udarnu eroziju..... | 28 |
| Slika 30. | Srednje vrijednosti faktora trošenja za čelike 1 i 2 | 30 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Kvantitativna analiza uzoraka | 16 |
| Tablica 2. Tvrdće uzoraka po Vickersu..... | 18 |
| Tablica 3. Opis ispitivanja otpornosti na abraziju | 21 |
| Tablica 4. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja | 26 |
| Tablica 5. Gubitak mase uzorka abrazivnom erozijom | 27 |
| Tablica 6. Gubitak mase uzorka udarnom erozijom..... | 28 |
| Tablica 7.1. Rezultati ispitivanja čelika 1 na mjedenom ispitnom prstenu..... | 29 |
| Tablica 7.2. Rezultati ispitivanja čelika 2 na mjedenom ispitnom prstenu..... | 29 |
| Tablica 8.1. Rezultati ispitivanja čelika 1 na čeličnom ispitnom prstenu | 30 |
| Tablica 8.2. Rezultati ispitivanja čelika 2 na čeličnom ispitnom prstenu | 30 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------|-------------------|--|
| d | mm | kalibar cijevi |
| t | mm | dubina žlijeba |
| a | mm | širina polja |
| b | mm | širina žlijeba |
| l | mm | apsolutna dužina koraka žlijeba |
| α_u | ° | kut uvijanja |
| F_P | N | sila barutnih plinova na dno projektila |
| F_Z | N | sila barutnih plinova na čelo zatvarača |
| E | N/mm ³ | modul elastičnosti |
| t | °C | temperatura |
| F_N | N | normalna komponenta opterećenja |
| F_t | N | tangencijalna komponenta opterećenja |
| α | ° | kut udara čestice erozijom česticama |
| HV-02 | HV | tvrdoća po Vickersu silom od 0.02 N |
| v_u | m/s | brzina vrtnje uzorka za erozijsko trošenje |
| F_T | N | sila trenja |
| μ | - | faktor trenja |

SAŽETAK

U cijevi svakog vatrenog oružja dolazi do vrlo složenih i intenzivnih mehaničkih, toplinskih i kemijskih procesa prilikom paljbe. Materijal cijevi izložen je djelovanju višestrukih mehanizama trošenja materijala, poglavito njezin unutrašnji dio ili kanal cijevi, koji je u izravnom dodiru s projektilom. U radu su proučeni mehanizmi trošenja cijevi i posljedice istrošenosti cijevi na balističke značajke jurišne puške.

Istraživanje prikazano u ovome radu provedeno je na čeliku za poboljšanje 32CrMoV12-10, namijenjenom za izradu cijevi naoružanja. Čelik je nabavljen od dva različita proizvođača, a u radu se nastoji ispitati podudarnost njihove tribološke otpornosti. Stoga su ispitni uzorci razvrstani u dvije skupine: čelik 1 i čelik 2. Svi uzorci su u poboljšanom stanju.

Kod ispitivanja otpornosti na trošenje abrazijom i erozijom česticama, ukupno su ispitana po dva uzorka za svaku grupu čelika po jednom mehanizmu trošenja, s tri ponovljena mjerenja. U oba slučaja, mjeren je gubitak mase uzorka kao kvantitativni pokazatelj za usporedbu otpornosti ispitnih uzoraka.

Pri ispitivanju otpornosti na adhezijsko trošenje, ispitan je po jedan uzorak svake grupe u tri ciklusa (na mjedenom i čeličnom prstenu). Pokazatelj otpornosti je faktor trenja μ postignut na dodirnoj površini između uzorka i ispitnog prstena.

Prije samih ispitivanja, čelicima je snimljena metalografska struktura te je izmjerena tvrdoća. Dobiveni rezultati prikazani su tablično i u obliku dijagrama.

Ključne riječi: jurišna puška, cijev, čelik od dva različita proizvođača, mehanizmi trošenja

SUMMARY

Inside of a gunbarrel of every firearm there are complex mechanical, thermal, and chemical processes during firing/shooting. Material of the gunbarrel is exposed to multiple wear mechanisms, especially the inner part or the bore, which is in direct contact with the projectile. Several wear mechanisms, as well as the side effects on the ballistic gun features, are studied in the paper.

Research has been done on certain steel, made by two different manufacturers and is criterion-based on their tribological resistance.

Test samples are made of 32-CrMoV12-10 steel, acquired from the two different manufacturers and are divided in two separate groups. Samples are quenched, tempered and stress relief annealed.

During the examination of abrasion and erosion wear resistance, two of the samples for each group of steel per one wear mechanism were tested. Examinations were repeated three times. In both cases, mass loss was measured as a quantitative analysis for comparing indices of erosion and abrasion.

While testing adhesion resistance, one sample of each steel groups was examined in three cycles (on brass and steel test ring). Adhesion resistance index is coefficient of friction μ achieved on the contact surface between test sample and a test ring.

The results obtained are shown in tables and charts.

Key words: assault rifle, gunbarrel, steel made of two different manufacturers, wear mechanisms

1. UVOD

Cijev oružja nositelj je procesa opaljenja oružja, tijekom kojeg dolazi do izgaranja barutnog punjenja, naglog razvoja barutnih plinova i velike količine topline. U zatvorenom prostoru barutne komore tlak barutnih plinova naglo raste, te se stvara dovoljno velika potisna sila na dno zrna pri procesu opaljenja, pod čijim se djelovanjem projektil kreće prema ustima cijevi. Pri izlasku iz cijevi, zrno mora postići potrebnu brzinu i aerodinamičku stabilnost. Takva potrebna svojstva im daje unutarnje ožljebljenje.

Iz ovoga slijedi da se tijekom opaljenja u cijevi oružja razvijaju intenzivni, međusobno interaktivni mehanički, toplinski, kemijski i tribološki procesi. Njihovim djelovanjem nastaju višestruki mehanizmi trošenja materijala uzduž kanala cijevi:

- abrazija,
- adhezija,
- erozija,
- tribokorozija.

U borbenim uvjetima, uz moguću prekomjernu paljbu, ovi mehanizmi trošenja rasti će eksponencijalno. Valja napomenuti kako je i vanjska površina cijevi izložena tribološkom djelovanju okoline. Najčešće je to tribokorozijski proces, čiji intenzitet također raste povećanjem zagrijanosti cijevi.

Glavni razlozi potrebe smanjenja trenja i trošenja su produžetak vijeka trajanja, povećanje učinkovitosti, smanjenje troškova održavanja, smanjenje troškova zastoja, poboljšanje pouzdanosti kao i povećanje sigurnosti.

Rad je napisan u šest poglavlja u kojima je opisana namjena i glavne značajke cijevi pješačkog naoružanja i njihova podjela. Opisane su glavne značajke projektila namijenjenog za ovu vrstu cijevi. Rad sadrži rezultate ispitivanja abrazijskog, erozijskog i adhezijskog trošenja na dva istovrsna čelika različite prizvodnje u poboljšanom stanju.

Cilj izrade rada je usporedba kvalitete otpornosti na trošenje dvaju čelika za poboljšavanje, istovrsnih po kemijskom sastavu, ali nabavljenih od različitih proizvođača.

Rezultati su nakon ispitivanja analizirani i prikazani tablično, te radi boljeg razumijevanja i praćenja sadržaja, rad je ilustriran slikama, dijagramima i tablicama.

2. NAMJENA, NAČELO RADA I TAKTIČKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE JURIŠNE PUŠKE

Jurišna puška jest pješačko oružje i primarno naoružanje vojnika, koje radi na principu povrata ili posudbe barutnih plinova. Pješačko oružje je skup sredstava ratne tehnike koja paljbenim djelovanjem izvršava različite zadaće. Namjena im je osobna zaštita, uništavanje i onesposobljavanje neprijateljske žive sile i ratne tehnike (lako oklopljenih vozila i lakih fortifikacijskih zapreka), za ciljeve u zraku i blisku borbu u napadu i obrani. Kao takvo, pješačko naoružanje je još uvijek najmasovnije oružje suvremenih vojski. Odlikuje ga dostatna bojевна moć, uz pouzdan rad i jednostavnost obuke i uporabe. Tipove pješačkog naoružanja razlikujemo po njihovom kalibru, tj. unutrašnjem promjeru cijevi i režimu paljbe. Kalibar nam određuje vatrenu moć, veličinu samog oružja, domet i veliku većinu taktičko-tehničkih značajki, dok režim paljbe može biti pojedinačni, poluautomatski i automatski. Oružja kod kojih se rad barutnih plinova u većem dijelu koristi za potiskivanje zrna, a u manjem dijelu za rad dijelova automatike nazivamo automatskim oružjima. Automatske ili jurišne puške, kao individualno oružje namijenjene su za borbu na udaljenostima 400-600 m, a kod združene paljbe više strijelaca djeluju na daljinama do 800 m. Mogu gađati pojedinačnom paljbom i kratkim rafalima. Spremnici su kapaciteta do 30 metaka. Moderne jurišne puške su najčešće opremljene Picatinny šinama, koje im omogućuju brzo stavljanje dodatne opreme poput tromblona za izbacivanja mina, laserskog ciljnika, nožica ili noža. Danas je u svijetu općenito podjela na dva kalibra; 5,56 mm NATO i 7,62 mm. [7]



Slika 1. Jurišna puška VHS D1 [6]

Primjer hrvatske proizvodnje naoružanja, proizvod tvrtke HS-produkt iz Karlovca, je jurišna puška VHS D1 prikazana na slici 1.

2.1. Cijev jurišne puške

Osnovni dijelovi jurišne puške su (slika 2): cijev, kućište, usadnik/kundak s povratnim mehanizmom, nosač zatvarača, zatvarač, klip, rukohvat sa mehanizmom za okidanje, spremnik, plinski cilindar/komora i skrivač plamena.

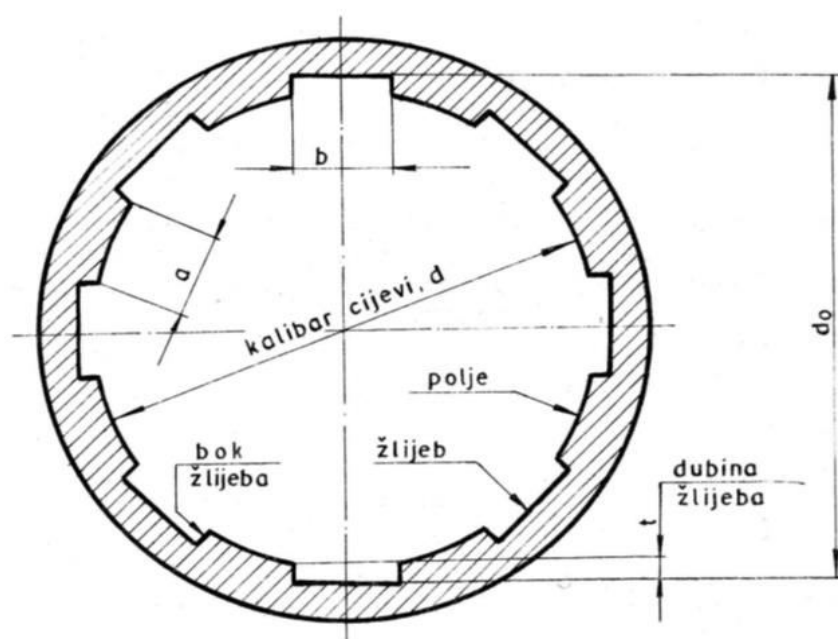


Slika 2. Osnovni dijelovi jurišne puške

Cijev je glavni dio pješačkog oružja i ima tri funkcije: u njoj se vrši opaljenje metka, daje pravac leta projektilu i omogućava mu rotacijsko kretanje oko vlastite osi. Unutrašnjost cijevi može biti ožljebljena ili glatka.

U unutrašnjosti ožljebljenih cijevi razlikuju se tri dijela: ležište metka, prijelazni konus i kanal cijevi. Prednji otvor cijevi su usta cijevi. Ležište metka služi za smještaj metka po dopremanju iz spremnika. Prijelazni konus je stožasti dio unutrašnjosti cijevi na koji se projektil oslanja onim dijelom gdje mu je promjer najveći i služi za postepeno urezivanje projektila u žljebove. Kanal cijevi je prednji, obično ožljebljeni, dio unutrašnjosti cijevi, koji projektilu daje pravac i rotaciju oko njegove uzdužne osi. Žljebovi daju rotaciju koja je neophodna radi stabilnosti metka na putanji, tj. kako bi projektil stalno letio vrhom naprijed. [3]

Na slici 3 prikazan je poprečni presjek cijevi s naznačenim dimenzijama kalibra cijevi d , dubine žlijeba t , širine polja a i širine žlijeba b . Žljebovi su udubljenja u cijevi u obliku blago zakrivljene linije. U modernom pješačkom oružju uvijaju se s lijeva u desno. Prostori između žljebova nazivaju se polja. Razmak između dva suprotna polja naziva se kalibar cijevi. Profil žljebova je za naoružanja većeg kalibra najčešće trapeznog presjeka, ali moguće su i izvedbe pravokutnog ili pilastog oblika. Trapezni profil se koristi jer je najotporniji, te je najlakša izrada i održavanje takvog profila.



Slika 3. Poprečni presjek cijevi [1]

Broj žljebova je proporcionalan kalibru cijevi, a mora biti djeljiv sa 4, 6 ili 8 zbog noževa na glavi alata za urezivanje. [1]

2.2. Konstrukcijske značajke/izvedbe cijevi jurišnih puški

Sve cijevi pješačkog naoružanja jednodjelni su segmenti, sa ili bez mogućnosti odvajanja sa kućišta. Postoje i naoružanja sa više od jedne cijevi, skoro uvijek istog kalibra, nastale zbog potrebe za većom vatrenom moći i smanjenjem erozije i pregrijavanja oružja. Ovisno o tipu i namjeni naoružanja, dužina i kalibar cijevi variraju. Tako se obično veže manji kalibar uz kraću cijev i obratno. [2]

Za primjer su uzeta dva tipa pješačkog naoružanja: jurišna puška AK-47 i jurišna puška VHS D1, K1/D2, K2, prisutne kao službene u OSRH, gdje se uz kratak opis i sliku mogu vidjeti različite konstrukcijske izvedbe cijevi.

2.2.1. Jurišna puška AK-47

Ova kulna ruska automatska puška, sa najviše inačica diljem svijeta, ima čeličnu cijev dužine 414 mm, kalibra 7.62 mm. Kanal cijevi i navoj za zaštinik usta cijevi na vrhu su kromirani, te je ožljebljen sa četiri žljeba koraka uvijanja 1/240 u desno, koji omogućuju početnu brzinu zrna od 720 m/s.



Slika 4. Jurišna puška AK-47 [10]

2.2.2. Jurišna puška VHS

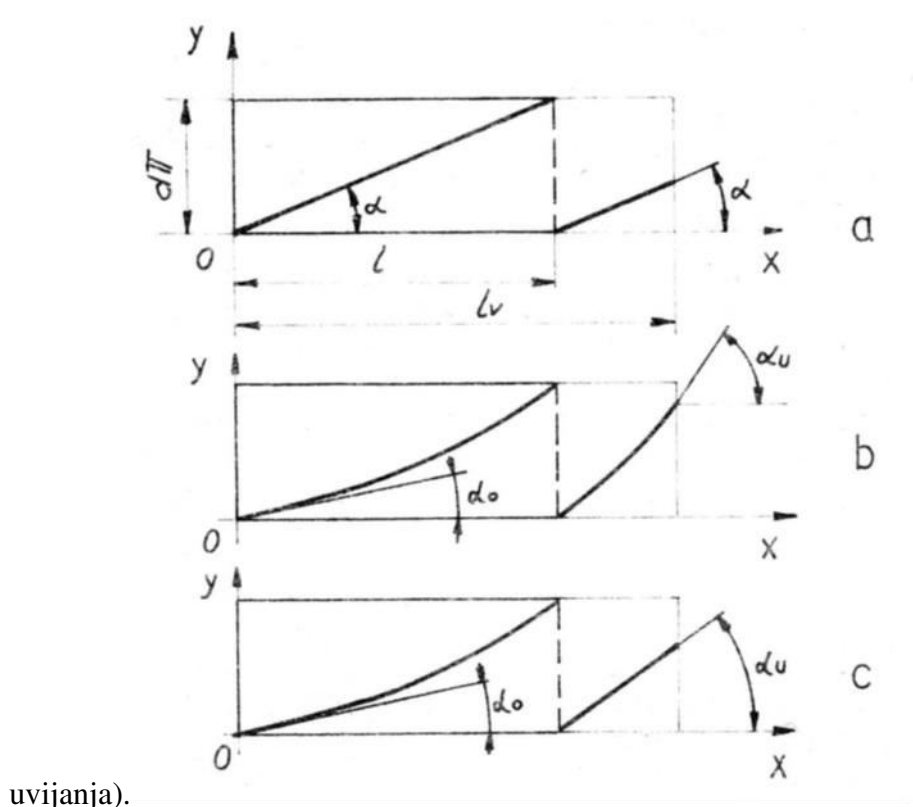
Automatska puška hrvatske proizvodnje, za razliku od AK-47, bull-pup je konstrukcije, što znači da su svi pokretni dijelovi smješteni u usadnik (kundak). To omogućuje da ukupna dužina puške bude manja, a cijev jednake dužine kao kod klasičnih jurišnih pušaka, ili čak duža. Oznake D i K govore nam o različitim duljinama cijevi (K=410 mm, D=500 mm), a 1 i 2 o inačicama. Kanal cijevi je kromiran tenifer postupkom, ožljebljen je sa 6 žlijebova koraka uvijanja 177.8 mm (7") u desno. Brzina metka na izlazu iz cijevi je 900 m/s za K i 950 m/s za D.



Slika 5. Jurišna puška VHS D2 [9]

Kao što je već spomenuto, cijevi obiju navedenih pušaka su ožljebljene. Źljebovi se uvijaju pod određenim kutom s obzirom na os kanala. Kada bi se cilindrični kanal cijeli razvio u jednu ravninu (x-y), vodeći dio cijevi bi se vidio u obliku pravokutnika dužine l koja je jednaka dužini cijevi i visine $d\pi$ koja je jednaka opsegu kalibra.

Na slici 6 prikazan je cilindrični kanal cijevi razvijen u ravninu x-y (a - s konstantnim kutom uvijanja; b - s progresivnim kutom uvijanja; c - s kombiniranim kutom



Slika 6. Źlijeb cijevi razvijen u ravnini x-y [1]

Veličina l je apsolutna dužina koraka Źlijeba. Duž apsolutne dužine koraka Źlijeba l zrno napravi jedan puni okretaj oko svoje uzdužne osi.

Ovisno o kutu uvijanja (a, b ili c, slika 6), mijenja se brzina projektila. Većim kutom uvijanja postižu se veće brzine rotacije. Ali zbog velikog kuta uvijanja dolazi do povećanja pritiska između bokova Źlijeba i bokova zubaca koje se oblikuju na boku zrna. Time nastaju velike sile trenja i dolazi do povećanog trošenja kanala cijevi. Zbog toga kut uvijanja mora biti što manji, upravo onoliki da osigura potrebnu okretnu brzinu projektila. [1]

Dubina Źlijeba t ovisi o kalibru cijevi d i iznosi:

$$t = (0.01 \text{ do } 0.015)d$$

3. ANALIZA TROŠENJA CIJEVI KOD PROCESA OPALJENJA ORUŽJA

Prilikom opaljenja dolazi do najintenzivnijeg trošenja pješačkog oružja. Opaljenje predstavlja vrlo složeni dinamički proces pri kojem se kemijska energija baruta njegovim izgaranjem u vrlo kratkom roku pretvara u toplinsku energiju barutnih plinova, a potom u kinetičku energiju projektila.

Proces opaljenja se odvija u sustavu koji čine: cijev, projektil (metak, koji se sastoji od čahure sa inicijalnom kapsulom i barutnim punjenjem na čijem vrhu je zrno, slika 7), okidač i mehanizam za okidanje koji na koncu udarnom iglom pokrene opaljenje.

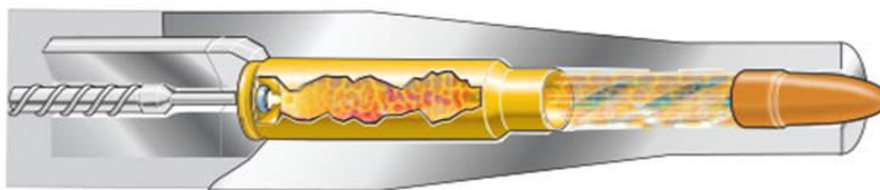


Slika 7. Poprečni presjek metka [8]

Proces opaljenja sastavljen je od tri osnovna procesa:

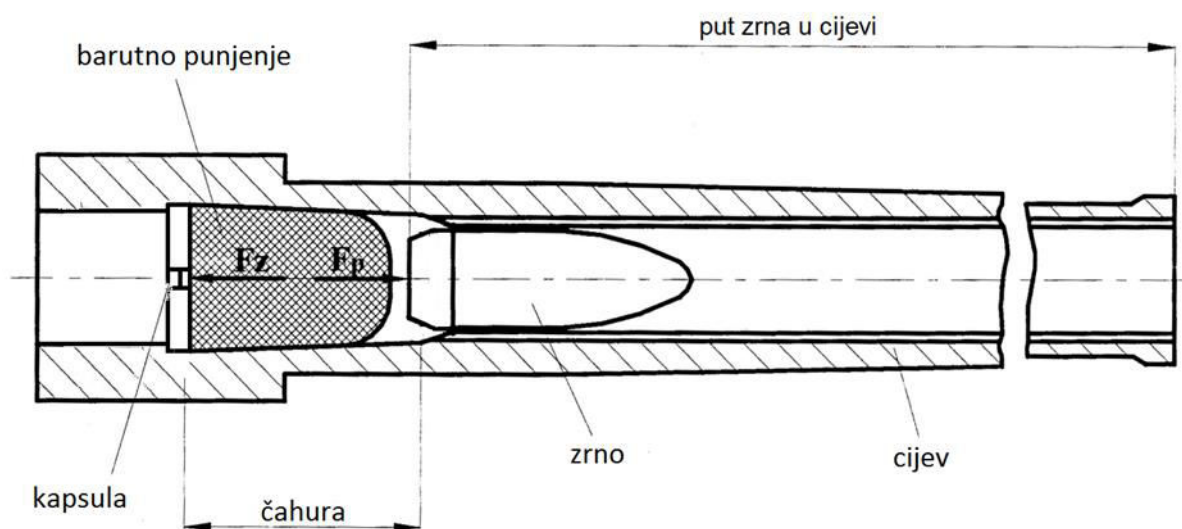
- proces izgaranja baruta i stvaranja barutnih plinova visoke temperature i visokog tlaka,
- proces pretvaranja toplinske energije barutnih plinova u kinetičku energiju kretanja sustava projektil – cijev – usadnik/rukohvat,
- proces kretanja plinova, barutnog punjenja, projektila i cijevi.

Ovi procesi su međusobno povezani i odvijaju se istodobno. Proces opaljenja traje oko jedne stotinke sekunde.



Slika 8. Proces opaljenja [6]

Tlak barutnih plinova nastalih izgaranjem barutnog punjenja djeluje na sve površine barutne komore i cijevi. Kao rezultat toga nastaje sila barutnih plinova F_p na dno projektila (slika 9), koja pokreće zrno prema ustima cijevi, te sila barutnih plinova F_z na čelo zatvarača (slika 9), koja svojim djelovanjem preko zatvarača izaziva kretanje cijevi i ostalih dijelova oružja koji su čvrsto spojeni. Sila F_z djeluje u suprotnom smjeru na smjer sile F_p i kretanje naboja i izaziva kretanje koje se naziva trzanjem (eng. recoil).

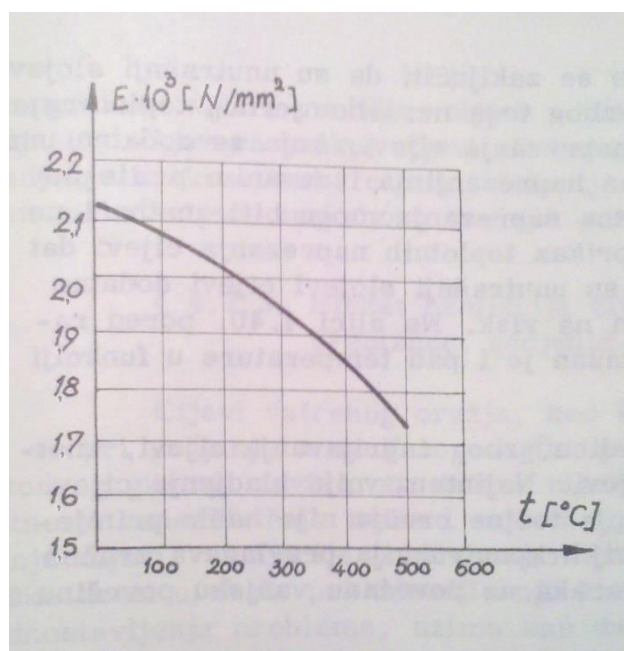


Slika 9. Presjek cijevi u trenutku opaljenja [6]

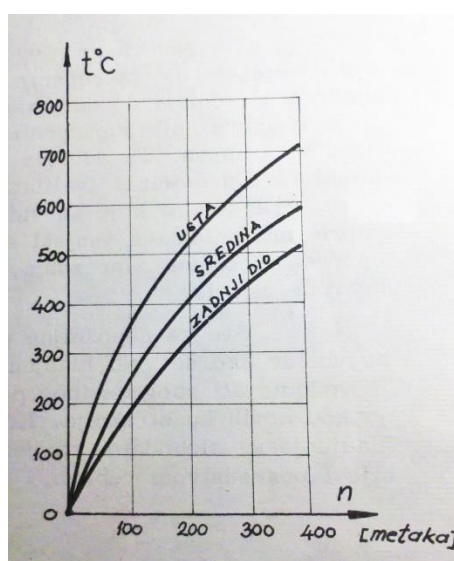
Barutni plinovi nastali tijekom procesa opaljenja imaju veliku unutarnju energiju. Samo manji dio te energije se koristi za kretanje zrna, dok je njezin preostali dio neiskorišten i predstavlja gubitke energija. Gubici se odnose na dio topline predan stijenkama cijevi oružja, na svladavanje otpora kretanja zrna u cijevi, na trzanje naoružanja, na preostalu unutarnju energiju zagrijanih barutnih plinova koji izlaze iz cijevi oružja, kao i manjim dijelom na tribološke procese koji predstavljaju unutarnje trošenje cijevi. [6]

3.1. Zagrijavanje i hlađenje cijevi pri gađanju

Promjena mehaničkih svojstva cijevi prikazana je padom vrijednosti modula elastičnosti sa povećanjem temperature (slika 10). Zagrijavanje cijevi pri gađanju nije ravnomjerno, kako po dužini cijevi, tako i po debljini njezinih stijenki. Na slici 11 prikazana je promjena temperature cijevi za zadnji dio, sredinu i usta cijevi ovisno o broju ispaljenih metaka. Na dijagramu se vidi da je temperatura cijevi najviša na ustima cijevi, iako je temperatura plinova na ustima cijevi niža. To je zbog toga što je cijev na tom dijelu najtanjih stijenki pa je i odnos topline i mase najveći. [4]



Slika 10. Promjena modula elastičnosti [4]



Slika 11. Promjena temperature po presjeku cijevi [4]

Na osnovi dijagrama može se zaključiti da je kanal cijevi temperaturno najopterećeniji, pa zbog takvog neravnotežnog opterećenja dolazi do unutrašnjih naprezanja cijevi koja se superponiraju s naprezanjima izazvanim pritiskom barutnih plinova.

Općenito, zagrijavanje cijevi pri gađanju iz automatskog naoružanja ima čitav niz nepoželjnih posljedica kao što su:

- smanjenje trajnosti cijevi,
- pogoršanje mehaničkih svojstava materijala i smanjenje otpornosti stijenki prema visokim pritiscima u cijevi za vrijeme izgaranja baruta,
- pogoršavaju se uvjeti ekstrakcije čahure iz ležišta uslijed promjene elastičnosti materijala,
- pogoršavaju se uvjeti kretanja automatike, pogotovo kod sistema što rade na principu kratkog trzaja cijevi jer se povećavaju zazori i gibanje gdje je nestabilnije,
- povećava se čeonni zazor, zbog povećane temperature stijenki, što nepovoljno utječe na funkciju oružja,
- otežano je ciljanje zbog pojačanog titranja zagrijanog zraka oko cijevi,
- savijanje cijevi zbog neravnomjernog zagrijavanja, uslijed nejednake debljine stijenki po dužini, dovodi do prevelike raspršenosti pogodaka,
- mogućnost samoopaljenja metka ako se duže zadrži u ležištu,
- ograničenje režima paljbe, a time i smanjenje borbenih sposobnosti naoružanja,
- pogoršani uvjeti opsluživanja oružja,
- potreba za većom debljinom cijevi smanjuje manevarsku sposobnost oružja.

Sve nepoželjne posljedice zbog zagrijavanja cijevi znatno se ublaže ako se vrši hlađenje cijevi. Najintenzivnije hlađenje cijevi je vodom, ali zbog znatnog povećanja težine oružja nije našlo primjenu kod novih konstrukcija. Kod novijih konstrukcija prevladava zračno hlađenje sa slobodnim strujanjem zraka uz povećanu vanjsku površinu cijevi djelovanjem rebara i ožljebljenja.

Kod automatskih oružja, cijevi su daleko deblje nego što je potrebno s gledišta čvrstoće materijala. To je uvjetovano samo radi boljeg hlađenja cijevi. Kod velikog broja oružja postoji mogućnost zamjene cijevi rezervnom cijevi koja se nosi u kompletu oružja. Intenzitet hlađenja cijevi ocjenjuje se prema porastu temperature po ispaljenom metku. Kod suvremenih oružja srednji prirast temperature po jednom ispaljenom metku je od 0.8-1.8 °C. [4]

3.2. Tribološke značajke procesa opaljenja

Utjecaj na trošenje cijevi pješačkih oružja imaju naboj i barutni plinovi, odnosno izgorjene barutne čestice, kao i djelovanje okolne atmosfere.

Prilikom kretanja zrna kroz cijev pješačkog oružja, na dodirnim površinama kanala cijevi i prstenova projektila se stvara pritisak i sila trenja klizanja. To je posebno izraženo kod oružja s ožljebljenom cijevi, gdje se košulja zrna utiskuje u profil žlijebova i polja kanala cijevi. Košulja zrna izrađena je od čistog elektrolitičkog bakra ili od mjedi. Prilikom kretanja projektila kroz cijev, čestice bakra ili mjedi se odvajaju od projektila i mikrozavaruju na čeličnu površinu kanala cijevi. Taj proces se naziva pobakrivanjem cijevi.

Zbog topline koja se oslobađa prilikom izgaranja barutnog punjenja dolazi do zagrijavanja cijevi. To uzrokuje promjene strukture materijala i njegovih mehaničkih svojstava. Naglo zagrijavanje pri opaljenju može dovesti do spontanog pougljičenja i zakaljenja površinskih slojeva kanala cijevi zbog prostrujavanja hladnog okolnog zraka kroz cijev. Zbog nejednolikog zagrijavanja po presjeku dolazi do stvaranja toplinskih naprezanja na površini kanala. Nakon većeg broja opaljenja ta naprezanja dovode do pojave površinskih mikropukotina, a međusobne kemijske reakcije stvaraju vrlo agresivnu atmosferu za materijal cijevi.

Osim topline, barutno punjenje nakon zapaljenja stvara i barutne plinove.

Barutni plinovi sadrže CO, CO₂, H₂O, H₂, i N₂ koji međusobnim kemijskim reakcijama stvaraju vrlo agresivnu atmosferu za materijal cijevi. U barutnim plinovima su sadržane i krute čestice: čestice čađe i neizgorenog baruta.

Čestice se s barutnim plinovima kreću velikom brzinom, te mehanički djeluju na površinu kanala cijevi (abrazivna erozija) i odnose materijal s mikroneravnina površine. Isto tako se zabijanjem u površinu materijala stvaraju žarišta razvoja korozije. [8]

Iz navedenog se vidi da proces opaljenja ima složeno tribološko djelovanje na cijev puške, koje se sastoji od:

- mehaničkog djelovanja,
- toplinskog djelovanja,
- kemijskog djelovanja.

3.2.1. Mehanizmi trošenja cijevi puške

Trošenje se može opisati kao postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom, i/ili česticama. Mehanizmi trošenja se opisuju jediničnim događajem. Jedinični događaj opisuje slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s površine.

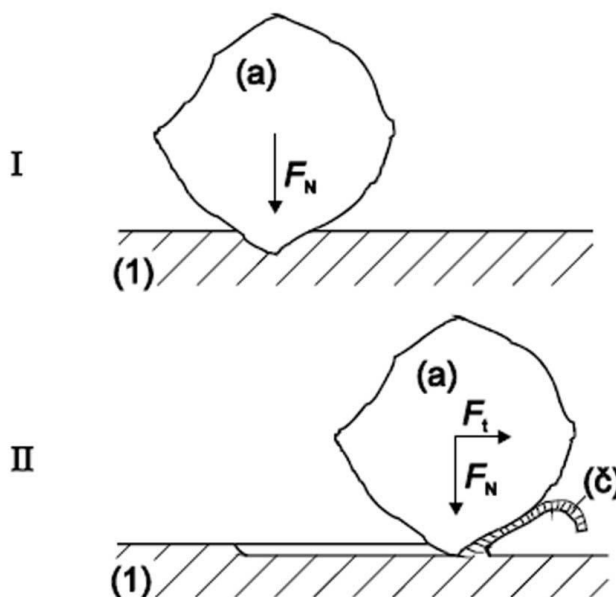
Proces trošenja cijevi puške sastavljen je od više elementarnih mehanizama trošenja. Kao posljedica djelovanja projektila na cijev, zajedno s djelovanjem barutnih plinova, razvijene topline, čestica čađi i baruta, te djelovanjem okolne atmosfere, najčešći i u ovom radu ispitani mehanizmi trošenja su:

- abrazija,
- erozija česticama,
- adhezija.

Ovi mehanizmi djeluju istodobno na cijev puške tijekom trajanja procesa opaljenja.

3.2.1.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Abrazija se može opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja. Na slici 12 prikazan je jedinični događaj abrazije.



Slika 12. Jedinični događaj abrazije [5]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

- I. faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N
- II. faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t

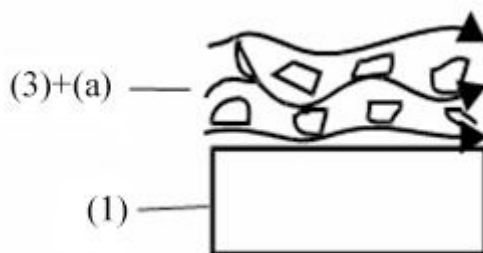
Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoće abraziva i tvrdoće materijala, abrazija se može podijeliti na tri slučaja:

- a) "čista" abrazija,
- b) selektivna abrazija,
- c) "nulta" abrazija.

Čista abrazija nastaje kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su u obliku spiralne ili lomljene strugotine, ovisno o tome je li abradirani materijal duktilan ili krhak. [5]

3.2.1.2. Erozija česticama

Procesi trošenja sastoje se od dva ili više mehanizama trošenja koji djeluju istodobno ili u vremenskom slijedu, ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima. Proces trošenja erozijom čestica može se opisati kao gubitak površine krutog tijela zbog strujanja fluida u kojemu se nalaze krute čestice. Proces erozije česticama prikazan je na slici 13.



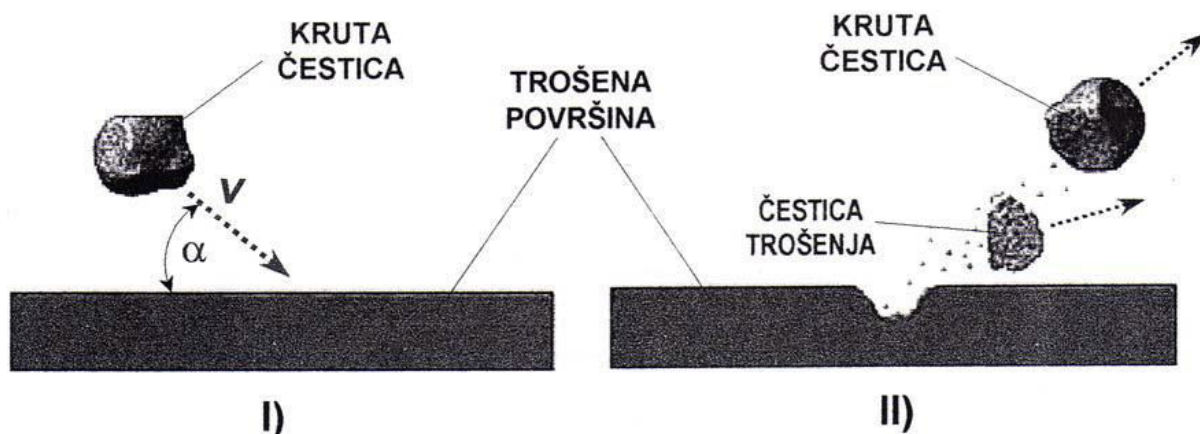
Slika 13. Shematski prikaz erozije česticama [5]

Kod erozije česticama dolazi do pojave više pojedinih mehanizama trošenja. Prema stupnjevima opasnosti od pojave to su sljedeći mehanizmi trošenja:

- Abrazija - vrlo visoki stupanj opasnosti (abrazivna erozija),
- Umor površine - visoki stupanj opasnosti (udarna erozija),
- Tribokorozija - najniži stupanj opasnosti.

Jedinični događaj erozije česticama prikazan na slici 14, sastoji se od dvije faze:

- I. faza - “upad“ krute čestice određenom brzinom gibanja i pod određenim kutom, te njezin trenutni sudar s trošenom površinom materijala,
- II. faza - odbijanje krute čestice od trošene površine uz prateće razaranje površine otkidanjem djelića materijala u obliku čestice trošenja.



Slika 14. Jedinični događaj procesa erozije česticama [5]

Prema kutu udara čestica erozija česticama može se podijeliti na abrazivnu i udarnu eroziju. Erozijska kod koje je strujanje čestica pod malim kutom u odnosu na površinu naziva se abrazivna erozija, a kada čestice udaraju površinu gotovo okomito, onda je to udarna erozija.

Kut udara α je definiran kao kut između erodiranog materijala i trajektorije erodivnih čestica. Ovisnost brzine erozije o kutu udara je značajno određena vrstom erodiranog materijala. Duktilni materijali, kao metali i legure, imaju najmanju otpornost na erozijsko trošenje za manje kutove, npr. 15° , 30° . Za razliku od njih, krhki materijali kao npr. staklo i keramika, najmanju otpornost na trošenje pokazuju za okomiti kut, tj. oko 90° . Također, o kutu udara ovisi koji će osnovni mehanizam trošenja prevladavati, prema tome kod erozijskog trošenja podjednako opasni mehanizmi trošenja mogu biti i abrazija i umor površine.

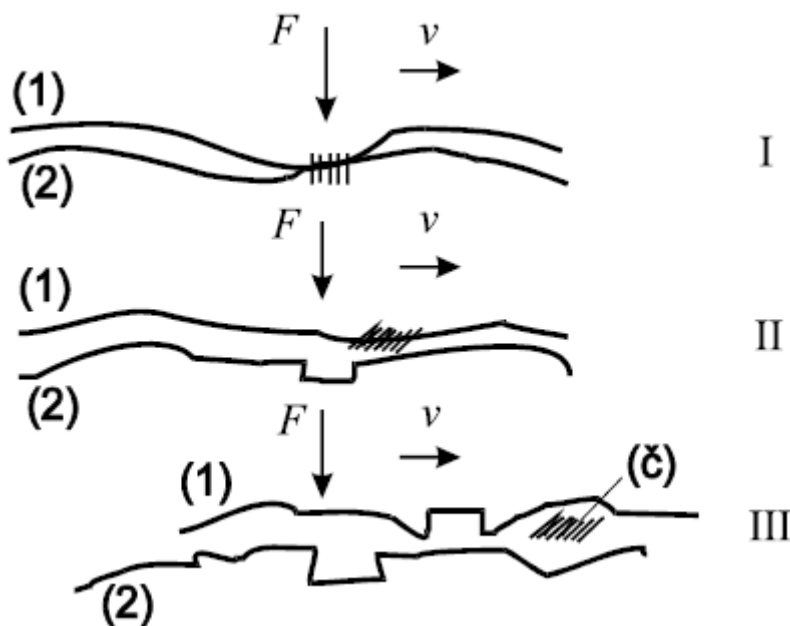
Osim kuta udara, na eroziju česticama utječu i drugi parametri:

- veličina čestica,
- brzina gibanja čestica,
- oblik erodivnih čestica,
- temperatura okoline.

Kod cijevi automatske puške erozija česticama se javlja i kao abrazivna erozija i kao udarna erozija. Abrazivna erozija nastaje kada čestice gareži i baruta velikom brzinom pod malim kutem udaraju u površinu kanala cijevi, te se kao posljedica javlja abrazijski mehanizam trošenja. Umor površine, kao mehanizam trošenja, nastaje zbog udarne erozije do koje dolazi kada čestice gareži i baruta velikom brzinom i pod velikim kutom udaraju u površinu kanala cijevi. [5]

3.2.1.3. Adhezija

Adhezijsko trošenje nastaje pri trenju klizanja. Dolazi do prijelaza materijala s jedne klizne plohe na drugu pri njihovom relativnom gibanju, zbog stvaranja mikrozavarenih spojeva. Otpornost na adheziju određena je sklonošću tarnog para prema stvaranju mikrozavarenih spojeva. Jedinični događaj adhezije može se opisat u tri faze i prikazan je na slici 15.



Slika 15. Jedinični događaj adhezije [5]

- I. faza - nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina.
- II. faza - raskidanje adhezijskog spoja, čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para.
- III. faza - otkidanje čestice, oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je lističast. [5]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Analiza uzoraka materijala cijevi jurišne puške

U ovom radu uspoređene su dvije grupe uzoraka proizvedene od čelika iste oznake, a nabavljena od dva različita proizvođača.

Ispitni uzorci izrađeni su od čelika 32 CrMoV12-10. Uzorci su kaljeni, poboljšani i žareni za redukciju zaostalih naprezanja.

Prije samih ispitivanja, čelicima je provjerena/ispitana metalografska struktura, tvrdoća i mikrostrukturno stanje površine.

Kao prvi korak ispitana je metalografska struktura na optičkom emisijskom spektrometru Leco GDS 850A (slika 16) prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Kvantitativna analiza uzoraka

| oznaka uzorka | % | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|-------|--------|------|------|------|------|------|---------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Al | V | Fe |
| 1 | 0,35 | 0,27 | 0,45 | 0,010 | 0,001 | 2,68 | 0,31 | 0,88 | 0,01 | 0,27 | ostatak |
| 2 | 0,39 | 0,32 | 0,51 | <0,01 | <0,001 | 2,85 | 0,19 | 0,87 | 0,02 | 0,28 | ostatak |



Slika 16. Leco GDS 850A optički spektrometar

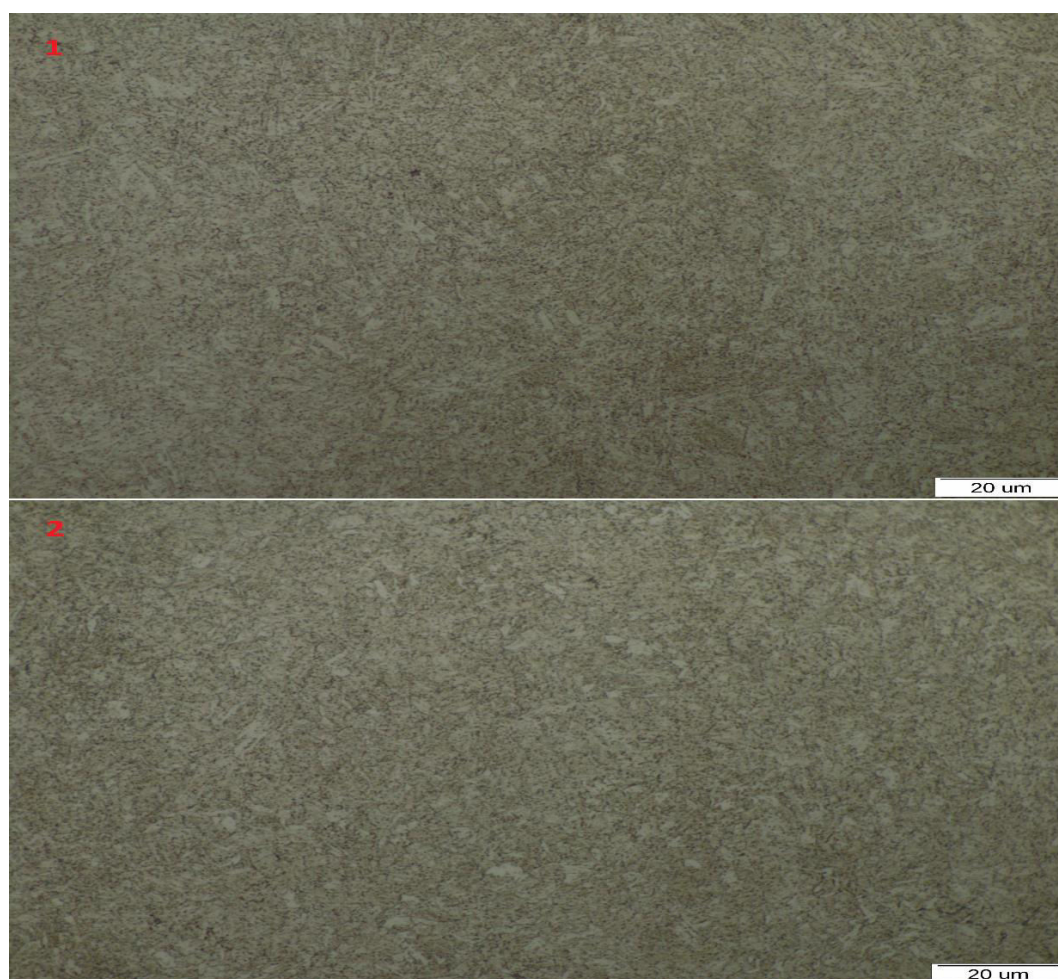
Uzorci su nakon toga pripremljeni za karakterizaciju materijala. Po jedan uzorak svakog čelika bio je zaliven u polimernu masu na način da su bili prekriveni prahom, stegnuti pod tlakom od 25 bar i zagrijani grijačem pod $150 \pm 5^\circ$ na 15 min, potom ohlađeni u vodi.

Zatim su u cilju izjednačavanja neravnina duž površine uzorci brušeni sa brusnim papirima SiC. Brušenje je obavljeno sa 5 različitih finoća brusnog papira, od P320 do P40000 kao najfinijega, na uređaju za brušenje. Brzina brušenja je bila 300 okr/min, a za hlađenje je korištena voda.

Za poboljšanje izgleda uzoraka postizanjem zrcalnog sjaja, uzorci su polirani. Postupak je proveden kroz dva koraka. U prvome je korištena MD-DAC tkanina i dijamantna pasta od $3\mu\text{m}$, dok su u drugom koraku korištene MD-NAP tkanina i $1\mu\text{m}$ dijamantna pasta. U oba koraka za hlađenje je korišten lubrikant, pri brzini od 150 okr/min.

Za bolji uvid u mikrostrukturu, uzorak je nagrizan u 3% NITAL-u u trajanju 5 s.

Konačni rezultat je snimljena mikrostruktura na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, gdje je za svaki uzorak referentna površina uvećana 50, 100, 200, 500 i 1000 puta.



Slika 17. Snimka mikrostrukture uzoraka 1 i 2 sa povećanjem 1000x

Kao što je vidljivo na slici 17, nema značajnih razlika u mikrostrukturi dvaju metala i u oba slučaja se radi o martenzitnom poboljšanom čeliku.

4.1.1. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je izmjerena po Vickersu (HV-02), prodiranjem dijamantne četverostrane piramide s vršnim kutom od 136° , opterećene silom $F = 0.02 \text{ N}$ (uteg od 200 g). Udubljenje piramide daje kvadrat na površini uzorka, ali zbog netočnosti postupka, nesavršenosti uzorka i sličnog (često puta je kvadrat iskrivljen), mjeri se jedna dijagonala kvadrata. Uzima se vrijednost lijevog (x_1) i desnog (x_2) vrha dijagonale, a referentna vrijednost za iščitavanje tvrdoće iz Tablice tvrdoće za mikrotvrdomjer PMT-3 je izražena formulom:

$$(x_2 - x_1) \cdot 0.302$$

Konačni rezultat se dobio aritmetičkom sredinom triju mjerenja i za jedan i za drugi čelik. Vrijednosti tvrdoće HV-02 dvaju čelika prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Tvrdoće uzoraka po Vickersu

| Uzorak | Tvrdoća (HV-02) |
|--------|-----------------|
| 1 | 276 |
| 2 | 275 |



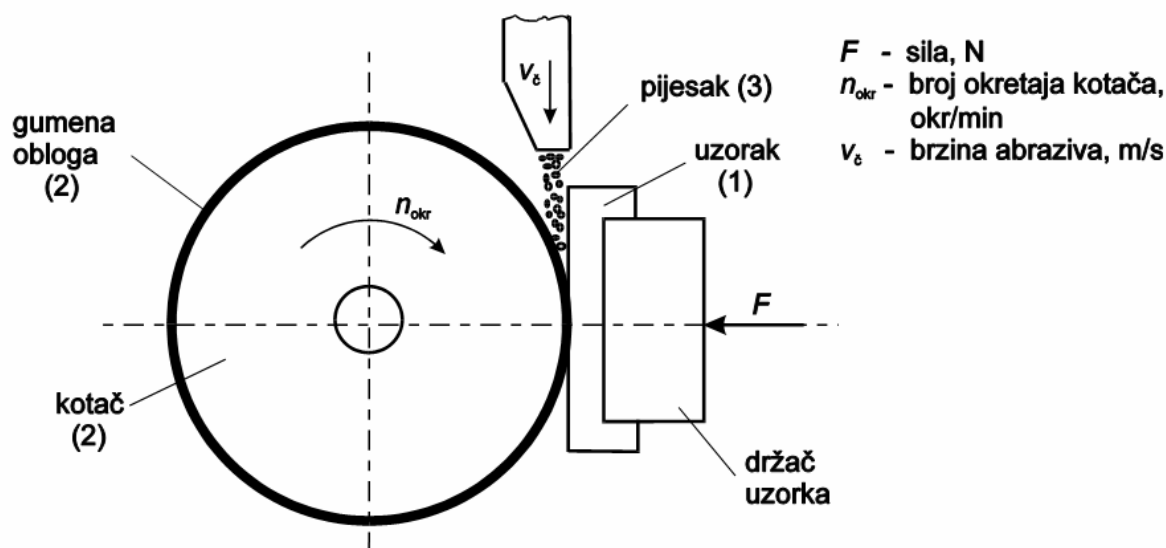
Slika 18. Mjerenje tvrdoće po Vickersu

Uz mjerenje tvrdoće po Vickersu, napravljeno je i dodatno mjerenje tvrdoće po Brinellu, gdje su rezultati u sličnoj korelaciji i kao kod HV-02, nema značajnijih razlika.

4.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom geometrijski nedefinirane oštrice.

Otpornost na abrazijsko trošenje ispituje se metodom “suhi pijesak/gumeni kotač” na istoimenom uređaju. Shema (skica) uređaja prikazana je na slici 19.



Slika 19. Skica uređaja “suhi pijesak/gumeni kotač” [5]

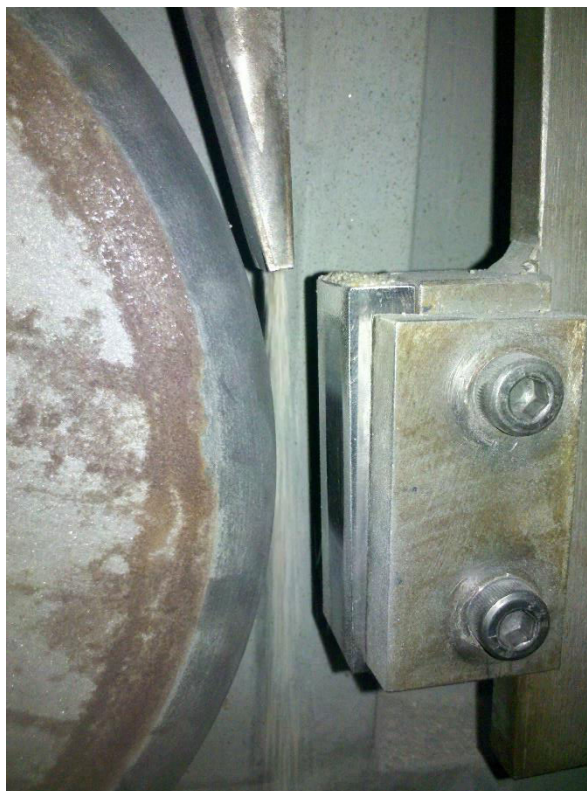
Ispitivanje se sastoji od abradiranja uzorka (1) standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70 (3). Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore A, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila F iznosi 130 N ili 45 N ovisno o varijanti postupka, a još je promjenljiv i ukupni broj okretaja kotača koji se registrira brojačem. Nakon završetka ispitivanja na uzorku ostaje trag kao na slici 20 gdje je prikazan i detalj uređanja sa sapnicom.

Vaganjem uzorka prije i poslije ispitivanja utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena. Ova metoda omogućuje relativno rangiranje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala ako je prevladavajući mehanizam trošenja abrazija. [5]

Sažeti opis ispitivanja “suhi pijesak/gumeni kotač” dan je u tablici 3.



Slika 20. Uređaj “suhi pijesak/gumeni kotač”



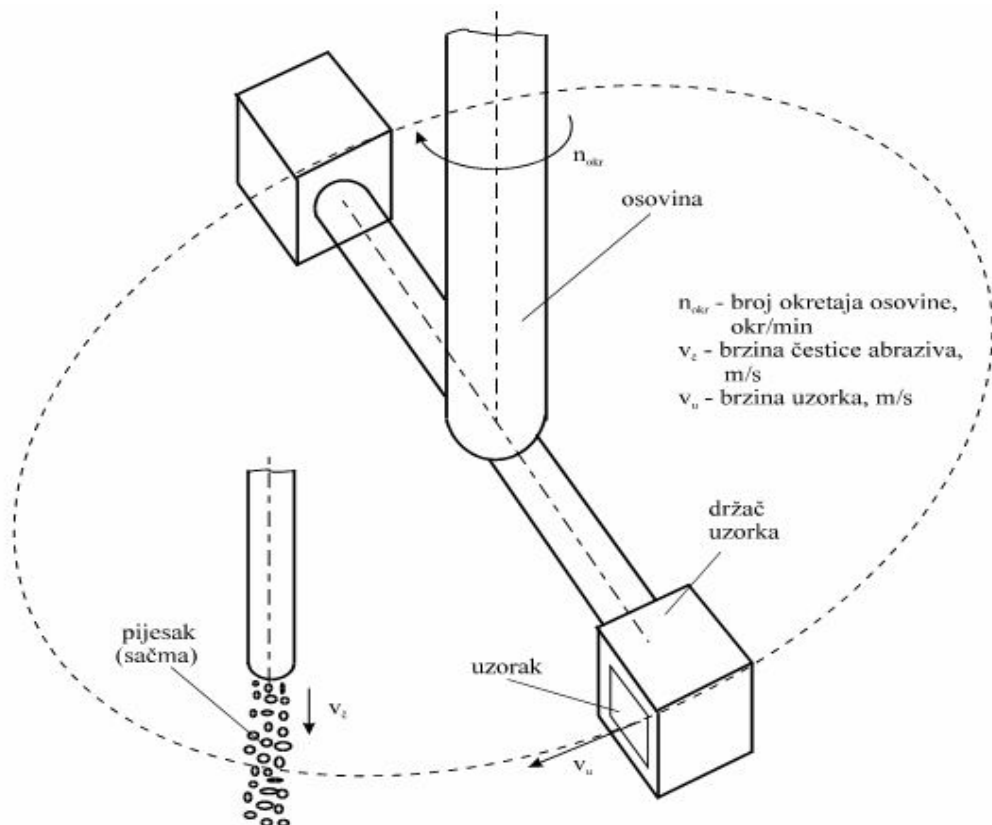
Slika 21. Detalj uređaja i trag trošenja na uzorku

Tablica 3. Opis ispitivanja otpornosti na abraziju

| | |
|--------------------|---|
| Svrha ispitivanja | Određivanje otpornosti na trošenje materijala na abraziju trećim dijelom |
| Uzorci | Ravni (površinski modificiran) uzorak (dimenzije: $\approx 76 \times 25 \times (3,2-12,7)$ mm), u kontaktu s rotirajućim gumenim kotačem. Abrazivne čestice su čestice zaobljenog kvarcnog pijeska standardne granulacije |
| Uvjeti ispitivanja | - Brzina rotacije kotača: 200 ± 10 okr/min - Opterećenje: 45 N ili 130 N - Protok abraziva: 250-400 g/min |
| Mjerenje | - Gubitak mase - Dubina traga trošenja analizom profila |
| Vrsta trošenja | Abrazija pri malom naprezanju |

4.3. Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje

Erozijsko trošenje je gubitak površine krutog tijela zbog strujana fluida u kojem se nalaze krute čestice. Osnovni princip ispitivanja erozijskog trošenja u ovom završnom radu shematski je prikazan na slici 22.

**Slika 22. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje [5]**

Ispitivanje je provedeno na uređaju za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje, prikazanom na slici 23.



Slika 23. Uređaj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje

Uzorci su podvrgnuti erozijskom trošenju tako da se uzorak pričvrsti u glavu držača. Držać uzoraka pričvršćen je na osovinu s krakom od 161 mm (promjera 322 mm). Prilikom okretanja uzoraka abraziv prolazi kroz sapnicu (pod utjecajem gravitacije) i uzorak udara u abraziv brzinom $v_u=24,265$ m/s (slika 24).



Slika 24. Glava držača sa pričvršćenim uzorkom i sapnica

Brzina sudara uzorka i čestica pijeska proizlazi iz:

$$v_u = \frac{D\pi n_{okr}}{60} = 24,265 \text{ m/s}$$

Gdje je :

- D - promjer na kojemu su učvršćeni uzorci (D=322 mm), [mm],
- n_{okr} - broj okretaja osovine (držača), 1440 okr/min,
- v_u - brzina vrtnje uzorka, [m/s].

Parametri ispitivanja su sljedeći:

- broj okretaja uzoraka: 1440 okr/min,
- abraziv: pijesak OTTAWA AFS 50/70 ,
- kut udaranja abraziva: 90°,
- vrijeme ispitivanja: 60 min, s mjerenjem gubitka mase svakih 15 min,
- veličina površine uzorka: 18x18mm,
- promjer sapnice: 5 mm. [5]

Stupanj erozije određuje se mjerenjem gubitka mase uzorka. Zbog toga je pri ispitivanju mjerena masa uzorka prije ispitivanja, te nakon 15, 30, 45 i 60 minuta trošenja.

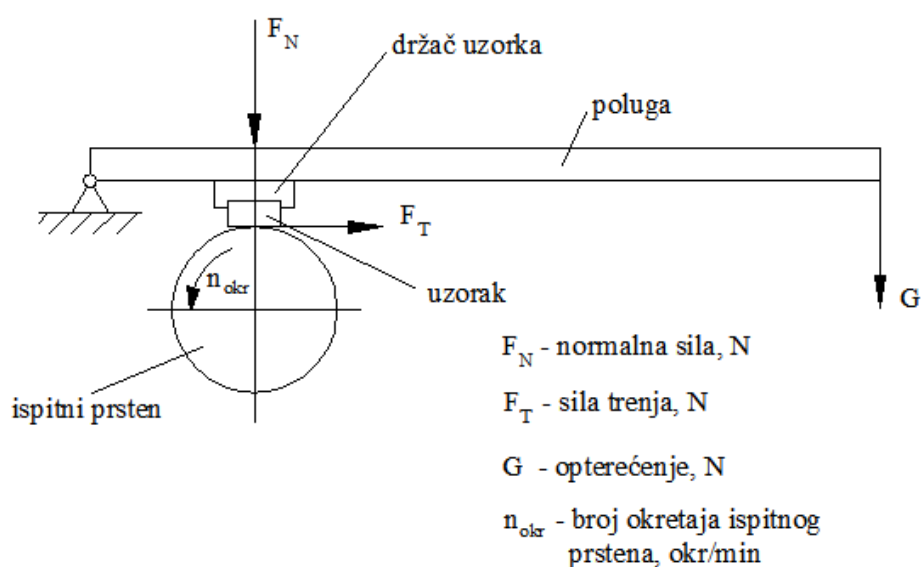


Slika 25. Vaga METTLER B5C 1000

Gubitak mase, kao i kod ispitivanja otpornosti na abraziju, (razlika mase prije i nakon ispitivanja) mjerena je na vagi METTLER B5C 1000 rezolucije 0,0001 g u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje (slika 25).

4.4. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Otpornost na adhezijsko trošenje ispitana je na uređaju koji je shematski prikazan na slici 26.



Slika 26. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje [5]

Čelični prizmatični uzorak je učvršćen u držaču uzorka i tijekom ispitivanja miruje. Mjedeni ili čelični ispitni prsten rotira s 1,5 okr/min, te tako kliže po čeličnom uzorku. Normalna sila F_N na dodirnim površinama podešena je na vrijednost od 200 N, a sila trenja F_T očitava se na mjernom instrumentu uređaja (slika 27).



Slika 27. Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Poznavanjem ovih dvaju sila izračuna se faktor trenja klizanja μ prema izrazu:

$$\mu = F_T/F_N$$

Adhezijsko trošenje nastaje kao posljedica trenja klizanja između dvaju površina koje su u dodiru u relativnom kretanju. To znači da su upravo sila trenja F_T i faktor trenja μ pokazatelji otpornosti materijala na adhezijsko trošenje: što su vrijednosti ovih pokazatelja manje, to je otpornost na adhezijsko trošenje veća.

No, prethodna tvrdnja vrijedi samo u slučaju kada prilikom trošenja materijal ostaje u čvrstom stanju i ne dolazi do njegovog taljenja. Takav je slučaj bio i prilikom izvođenja triboloških ispitivanja opisanih u ovom radu. Kada tijekom adhezijskog trošenja dođe do taljenja površinskog sloja materijala, zbog njegove žitkosti opada faktor trenja, ali se intezitet trošenja naglo povećava.

5. ANALIZA REZULTATA

5.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitana su 2 uzorka od svakog čelika, na način da je svaki uzorak bio abrazivno trošen u 3 ciklusa na tri plohe. Mjeren je gubitak mase nakon svakog ciklusa od 100, 500 i 1000 okretaja pod opterećenjem od $F = 130 \text{ N}$. Srednje vrijednosti izmjerenog gubitka mase prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Gubitak mase uslijed abrazijskog trošenja

| Čelik | Gubitak mase (g) nakon određenog broja okretaja | | | | | |
|-------|---|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| | 100 | | 500 | | 1000 | |
| 1 | 0,0223; 0,0233; 0,0237 | | 0,0822; 0,0892; 0,0661 | | 0,1; 0,097; 0,1021 | |
| | srednja vrijednost | 0,0231 | srednja vrijednost | 0,0792 | srednja vrijednost | 0,0997 |
| 2 | 0,0133; 0,0137; 0,0178 | | 0,0838; 0,0844; 0,0904 | | 0,0491; 0,0687; 0,1005 | |
| | srednja vrijednost | 0,0448 | srednja vrijednost | 0,0862 | srednja vrijednost | 0,0727 |

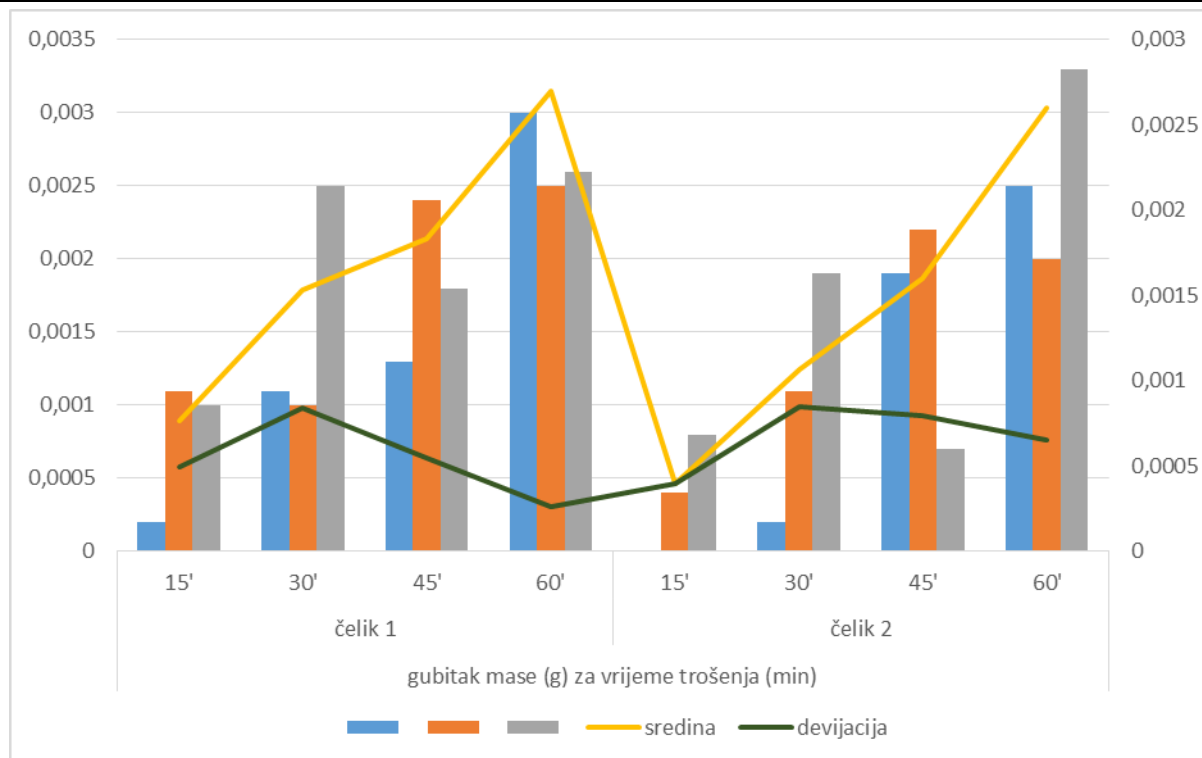
Podaci iz tablice 4 pokazuju da je između dvaju ispitanih čelika nakon završenog ciklusa trošenja izmjereni gubitak mase kod čelika 2 za 27,08 % manji nego kod čelika 1.

5.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje

Ispitana su 4 uzorka sa tri ponavljanja za abrazivnu (90°) i tri ponavljanja za udarnu (30°) eroziju. Uzorci su izađeni od dva različita čelika od kojih je svaki poboljšán i žaren za redukciju zaostalih naprezanja. Dobiveni rezultati ispitivanja otpornosti na erozijsko trošenje prikazani su zbog lakše preglednosti, tablično i na dijagramima. U dijagramskim prikazima zorno su predočene srednja vrijednost (\bar{x}) rezultata i standardna devijacija (σ) izračunate u tablicama.

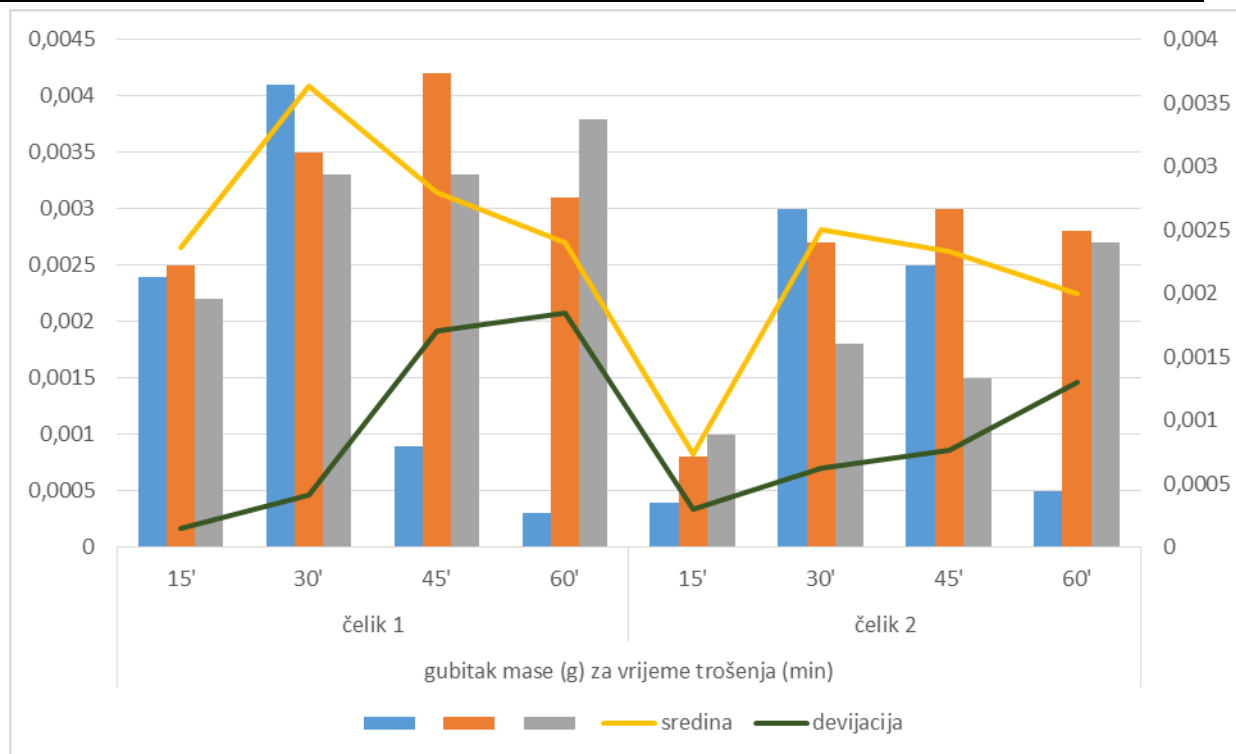
Tablica 5. Gubitak mase uzoraka abrazivnom erozijom

| Abrazivna erozija (90°) | | | | | |
|-------------------------|-----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Čelik | | Gubitak mase (g) za vrijeme trošenja (min) | | | |
| | | 15' | 30' | 45' | 60' |
| 1 | | 0,0002 | 0,0011 | 0,0013 | 0,003 |
| | | 0,0011 | 0,001 | 0,0024 | 0,0025 |
| | | 0,001 | 0,0025 | 0,0018 | 0,0026 |
| | \bar{x} | 0,000767 | 0,001533 | 0,001833 | 0,0027 |
| | σ | 0,000493 | 0,000839 | 0,000551 | 0,000265 |
| 2 | | 0 | 0,0002 | 0,0019 | 0,0025 |
| | | 0,0004 | 0,0011 | 0,0022 | 0,002 |
| | | 0,0008 | 0,0019 | 0,0007 | 0,0033 |
| | \bar{x} | 0,0004 | 0,001067 | 0,0016 | 0,0026 |
| | σ | 0,0004 | 0,00085 | 0,000794 | 0,000656 |

**Slika 28. Dijagram gubitak mase/vrijeme trošenja za abrazivnu eroziju**

Tablica 6. Gubitak mase uzoraka udarnom erozijom

| Udarna erozija (30°) | | | | | |
|----------------------|-----------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Čelik | | Gubitak mase (g) za vrijeme trošenja (min) | | | |
| | | 15' | 30' | 45' | 60' |
| 1 | | 0,0024 | 0,0041 | 0,0009 | 0,0003 |
| | | 0,0025 | 0,0035 | 0,0042 | 0,0031 |
| | | 0,0022 | 0,0033 | 0,0033 | 0,0038 |
| | \bar{x} | 0,002367 | 0,003633 | 0,0028 | 0,0024 |
| | σ | 0,000153 | 0,000416 | 0,001706 | 0,001852 |
| 2 | | 0,003 | 0,003 | 0,0025 | 0,0005 |
| | | 0,0004 | 0,0027 | 0,003 | 0,0028 |
| | | 0,0014 | 0,0018 | 0,0015 | 0,0027 |
| | \bar{x} | 0,0014 | 0,0025 | 0,00233 | 0,002 |
| | σ | 0,0014 | 0,000624 | 0,00764 | 0,0013 |



Slika 29. Dijagram gubitak mase/vrijeme trošenja za udarnu eroziju

Analizom rezultata uzoraka prikazanih u tablici 5 i tablici 6 i grafički prikazanih na pripadnim dijagramima (slika 28, slika 29), može se zaključiti da je čelik 2 u određenoj mjeri otporniji i na abrazivnu i na udarnu eroziju.

5.3. Rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje

Ispitana su četiri uzorka sa tri ponavljanja na mjedenom i tri ponavljanja na čeličnom ispitnom prstenu. Trajanje ispitivanja za svaki uzorak je 60 s. Rezultati se očitavaju u početnom trenutku ispitivanja, te nakon svakih 15 s ispitivanja. Sila trenja F_T očitava se na mjernom instrumentu uređaja. Rezultati ispitivanja za čelike 1 i 2 prikazani su tablicama 7.1. i 7.2. za mjedeni i 8.1. i 8.2. za čelični ispitni prsten.

Konačna analiza učinjena je preko dijagrama srednjih vrijednosti faktora μ za trošenje na mjedenom prstenu, prikazanog na slici 30.

Tablica 7.1. Rezultati ispitivanja čelika 1 na mjedenom ispitnom prstenu

| | | | 1. ispitivanje | | | 2. ispitivanje | | | 3. ispitivanje | | |
|-------|----------------|-------|----------------|-----------|-------|----------------|-----------|-------|----------------|-----------|-------|
| čelik | Ispitni prsten | t [s] | L [mm] | F_T [N] | μ | L [mm] | F_T [N] | μ | L [mm] | F_T [N] | μ |
| 1 | mjedeni | 15 | 4,35 | 24,33 | 0,121 | 4,45 | 25,03 | 0,125 | 4,35 | 24,33 | 0,121 |
| | mjedeni | 30 | 4,25 | 23,63 | 0,118 | 3,65 | 19,42 | 0,097 | 4,25 | 23,63 | 0,118 |
| | mjedeni | 45 | 4,15 | 22,93 | 0,114 | 4,55 | 25,73 | 0,128 | 4,05 | 22,22 | 0,111 |
| | mjedeni | 60 | 4,35 | 24,33 | 0,121 | 4,6 | 26,08 | 0,13 | 4,15 | 22,93 | 0,114 |

Tablica 7.2. Rezultati ispitivanja čelika 2 na mjedenom ispitnom prstenu

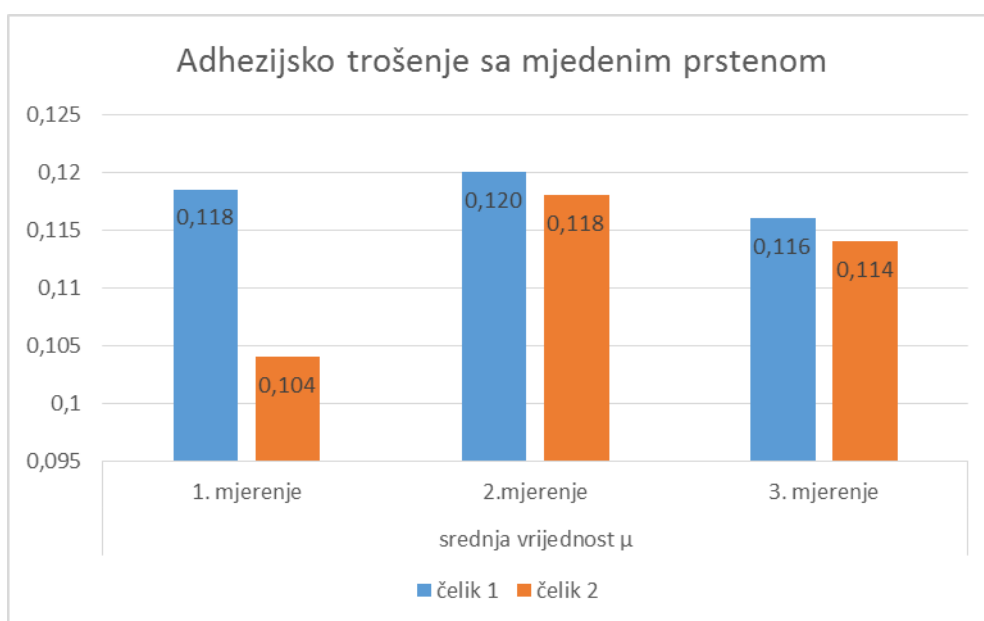
| | | | 1. ispitivanje | | | 2. ispitivanje | | | 3. ispitivanje | | |
|-------|----------------|-------|----------------|-----------|-------|----------------|-----------|-------|----------------|-----------|-------|
| čelik | Ispitni prsten | t [s] | L [mm] | F_T [N] | μ | L [mm] | F_T [N] | μ | L [mm] | F_T [N] | μ |
| 2 | mjedeni | 15 | 4,25 | 23,63 | 0,118 | 3,85 | 20,82 | 0,104 | 3,85 | 20,82 | 0,104 |
| | mjedeni | 30 | 4,35 | 24,33 | 0,121 | 4,15 | 22,93 | 0,114 | 4,25 | 23,63 | 0,118 |
| | mjedeni | 45 | 4,3 | 23,98 | 0,119 | 4,35 | 24,33 | 0,121 | 3,95 | 21,52 | 0,107 |
| | mjedeni | 60 | 3,85 | 20,82 | 0,104 | 3,25 | 16,61 | 0,118 | 4,15 | 22,92 | 0,114 |

Tablica 8.1. Rezultati ispitivanja čelika 1 na čeličnom ispitnom prstenu

| | | | 1. ispitivanje | | | 2. ispitivanje | | | 3. ispitivanje | | |
|-------|----------------|-------|----------------|--------------------|-------|----------------|--------------------|-------|----------------|--------------------|-------|
| čelik | Ispitni prsten | t [s] | L [mm] | F _T [N] | μ | L [mm] | F _T [N] | μ | L [mm] | F _T [N] | μ |
| 1 | čelični | 15 | 2,4 | 10,65 | 0,053 | 2,4 | 10,65 | 0,053 | 2,3 | 9,95 | 0,049 |
| | čelični | 30 | 2,2 | 9,25 | 0,046 | 2,6 | 12,05 | 0,06 | 2,35 | 10,3 | 0,051 |
| | čelični | 45 | 2,3 | 9,95 | 0,049 | 2,45 | 11 | 0,055 | 2,25 | 9,6 | 0,048 |
| | čelični | 60 | 2,25 | 9,6 | 0,048 | 2,4 | 10,65 | 0,053 | 2,37 | 10,44 | 0,052 |

Tablica 8.2. Rezultati ispitivanja čelika 2 na čeličnom ispitnom prstenu

| | | | 1. ispitivanje | | | 2. ispitivanje | | | 3. ispitivanje | | |
|-------|----------------|-------|----------------|--------------------|-------|----------------|--------------------|-------|----------------|--------------------|-------|
| čelik | Ispitni prsten | t [s] | L [mm] | F _T [N] | μ | L [mm] | F _T [N] | μ | L [mm] | F _T [N] | μ |
| 2 | čelični | 15 | 2,15 | 8,9 | 0,044 | 2,4 | 10,65 | 0,053 | 2,45 | 11 | 0,055 |
| | čelični | 30 | 2,25 | 9,6 | 0,048 | 2,3 | 9,95 | 0,049 | 2,4 | 10,65 | 0,053 |
| | čelični | 45 | 2,2 | 9,25 | 0,046 | 2,35 | 10,3 | 0,051 | 2,4 | 10,65 | 0,053 |
| | čelični | 60 | 2,2 | 9,25 | 0,046 | 2,35 | 10,3 | 0,051 | 2,4 | 10,65 | 0,053 |

**Slika 30. Srednje vrijednosti faktora trenja za čelike 1 i 2**

Iz dijagrama srednjih vrijednosti faktora trenja može se utvrditi da postoje određene razlike kod pokazatelja otpornosti na adhezijsko trošenje, prema čemu se vidi da materijal čelika 2 pokazuje manji faktor trenja, odnosno veću otpornost na adhezijsko trošenje. Razlika je najizraženija za prvi ciklus ispitivanja, a niža u ostalom tijeku ispitivanja.

6. ZAKLJUČAK

Cijev je najvažniji dio svakog vatrenog oružja, pa se zbog vrlo složenih i intenzivnih mehaničkih, toplinskih i kemijskih procesa prilikom paljbe mora konstantno pratiti njeno stanje. Cijevi se rade od čelika za poboljšavanje. U radu je provedeno ispitivanje otpornosti na trošenje uzoraka od čelika 32-CrMoV12-10, nabavljenog od dva različita proizvođača te su uzorci razvrstani u dvije skupine. Ovim se istraživanjem nastojalo utvrditi koja će se skupina uzoraka pokazati otpornijom na trošenje.

Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje pokazuju da je gubitak mase kod čelika iz skupine 2 manja za 27,08 % nego kod čelika iz skupine 1.

Analizom rezultata uzoraka za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje, može se zaključiti da je čelik skupine 2 u određenoj mjeri otporniji i na abrazivnu i na udarnu eroziju.

Materijal čelika 2 pokazuje i manji faktor trenja, odnosno veću otpornost na adhezijsko trošenje. Razlika između skupina je bila najizraženija u prvom ciklusu ispitivanja, dok je u ostalom tijeku ispitivanja bila niža.

Čelik 2 pokazao je kod sva tri ispitivanja bolju otpornost na trošenje. Na trošenje cijevi utječe i niz drugih čimbenika, u prvom redu primijenjeni režim paljbe. No, s obzirom na predviđeni dugi radni vijek cijevi te desetak tisuća opaljenja i relativno manja neotpornost na trošenje rezultira značajnim stupnjem istrošenosti cijevi u određenoj fazi eksploatacije. Uz navedene čimbenike, ovisno o uvjetima održavanja i skladištenja, životni vijek cijevi može biti produljen.

Za daljnje istraživanje predlaže se modifikacija površine kanala cijevi nitriranjem, kromiranjem i odabranim tvrdim prevlakama te mjerenje i usporedba otpornosti na trošenje tako modificiranih uzoraka.

LITERATURA

- [1] Jakopčić, M.: Osnove topničkog naoružanja, Hrvatsko vojno učilište "Petar Zrinski" Zagreb, 1996.
- [2] Tehnički školski centar JNA: Osnovi balistike, Zagreb, 1960.
- [3] Vučinić O., Dinić O., Ristić T.: Pešadijsko naoružanje sa nastavom gađanja, Vojna štamparija Split, 1981.
- [4] Abdulic R., Cvetković M., Kravos I., Kršić N., Obrenović R., Pejčić V., Vučković D.: Osnovi klasičnog naoružanja, Tehnički školski centar KoV JNA, Zagreb, 1973
- [5] Grilec K., Ivušić V., Tribologija, Autorizirana predavanja, Zagreb, 2011.
- [6] Kerekeš, N.: Trošenje cijevi pješačkog naoružanja, Seminar, FSB, Zagreb, 2015.
- [7] Kadetska bojna: Materijali za obuku sa pješačkim naoružanjem, dokumentacija naoružanja, 2013.
- [8] Devetak D.: Konstrukcija jurišnih pušaka, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2013.
- [9] <http://www.muskiportal.com/poprecni-presjek-metka/>
- [10] <http://www.hs-produkt.hr/vhs-d2-cal-556x45-mm/>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Mikhail_Kalashnikov

PRILOZI

I. CD-R disc